

Análisis de Errores Sistemáticos en un Polarímetro a 90 GHz para Aplicaciones de Radioastronomía

F.J. Casas, David Ortiz

casas@ifca.unican.es, ortizgd@ifca.unican.es

Instituto de Física de Cantabria. Edificio Juan Jordá, Campus de la Universidad de Cantabria, Avenida de los Castros s/n, 39005. Santander (Cantabria)

Abstract- This paper describes a systematic error analysis applied to a 90 GHz receiver designed to measure the polarization of the Cosmic Microwave Background (CMB) radiation. Although the reported polarimeter allows the measurement of the Stokes parameters (I, Q, U) of the CMB, a previous systematic errors analysis is required in order to correct them when using the instrument to measure the radiation coming from the sky. In this work two sources of systematic errors, as the amplitude and phase imbalance between the two main branches of the polarimeter, are taken into account. These branches are assumed to have the same gain and phase, so the imbalance effects will be studied over the polarimeter's detected signal and the corresponding polarization measurement.

I. INTRODUCCIÓN

Para profundizar en el conocimiento de la física inflacionaria que tuvo lugar en las etapas iniciales de la creación del universo es necesario medir y analizar la polarización de la radiación proveniente del Fondo Cósmico de Microondas (CMB, de sus siglas en inglés) [1] en diversas bandas de milimétricas y microondas. Este trabajo se enmarca dentro de un proyecto dedicado, en parte, al desarrollo de nuevos instrumentos de microondas para el estudio de la polarización del CMB. En particular, en colaboración con el grupo de microondas del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (DICOM) de la Universidad de Cantabria, se está diseñando y fabricando un demostrador de polarímetro que funciona en la banda W (90 GHz) [2]. Esta banda es de interés para observaciones terrestres debido a que la atmósfera presenta uno de sus mínimos de opacidad, de forma que estas medidas serían complementarias a las de los instrumentos MFI (10-20 GHz) [3], TGI (30 GHz) [4] y FGI (40 GHz) del experimento QUIJOTE [5], sirviendo para la supresión de los diversos contaminantes que se obtienen junto con la señal de CMB.

El esquema del polarímetro al que se refiere el presente trabajo se muestra en la Figura 1. La bocina del receptor es sustituida en este caso por un generador de señal que emula a la señal recibida cuando se está midiendo la radiación proveniente del cielo. Las señales de entrada al instrumento se descomponen en sus componentes polares circulares a derechas e izquierdas gracias a un polarizador y un transductor de ortomodo (OMT). Después, las señales de ambas ramas son amplificadas primero a temperatura criogénica y después a temperatura ambiente. Un filtro paso-

banda sirve para definir la banda de frecuencia en la que opera el polarímetro.

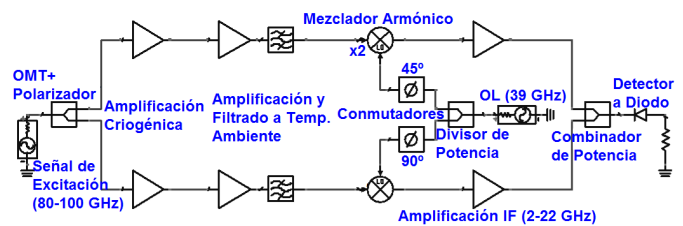


Fig. 1. Esquema simplificado del modelo idealizado del polarímetro a 90 GHz.

Debido a la complejidad de correlar y detectar señales de banda ultra-ancha a 90 GHz se utiliza una etapa de conversión en frecuencia para llevar la señal recibida desde la banda de 80-100 GHz a la banda de 2-22 GHz (IF). Esto se realiza mediante dos mezcladores armónicos, que mezclan la señal de entrada con el doble de la frecuencia de la señal de Oscilador Local (OL) de 39 GHz. Por otro lado, se introducen alternativamente desfases de 0°, 90°, 180° y 270° mediante dos conmutadores de fase de 45° y 90° aplicados sobre la señal de OL. Finalmente las señales se vuelven a amplificar en IF, para contrarrestar las pérdidas de conversión introducidas por los mezcladores, se suman mediante un combinador de potencia y la señal resultante se detecta mediante un detector a diodo comercial. Los detalles sobre las características de los subsistemas del polarímetro pueden consultarse en [2].

En este artículo se analiza el efecto de los errores sistemáticos sobre el funcionamiento del receptor a 90 GHz y la consiguiente medida de polarización del CMB. Se considerarán dos clases de errores sistemáticos relacionados con la diferencia de ganancia y fase entre las dos ramas principales del polarímetro. Se analizarán el efecto de dichas diferencias sobre la tensión detectada a la salida del polarímetro, así como sobre la medida de la polarización resultante.

Este trabajo se divide en cinco partes. En la Sección II se describe el análisis del funcionamiento del polarímetro y se presentan a modo de ejemplo algunos resultados de la simulación del mismo. La Sección III se dedica al análisis del efecto de los errores sistemáticos sobre la señal detectada mientras que la Sección IV se centra en los efectos sobre la

medida correspondiente de polarización. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo en la Sección V.

II. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL POLARÍMETRO

El funcionamiento del polarímetro y la forma de obtener la medida de la polarización de la señal de entrada mediante los parámetros de Stokes queda descrito en detalle en [2]. Sin embargo, en este trabajo se describe de forma alternativa, y por supuesto equivalente, el funcionamiento del mismo. Para ello, se utilizan simulaciones de un modelo ideal implementado en el simulador ADS de Agilent (ahora Keysight) Technologies. El modelo realizado mediante elementos de librería sigue el esquema de la Fig. 1. Se aplica como excitación una señal sinusoidal con una potencia de -83 dBm que es aproximadamente la que tendrá el instrumento en la realidad. La frecuencia de dicha señal se barre desde 80 a 100 GHz para cubrir la banda de funcionamiento del polarímetro y se toma como valor de tensión detectada el valor medio de las tensiones detectadas correspondientes a cada valor de frecuencia individual. Este valor medio resultante es equivalente al obtenido mediante una señal de excitación más realista como el ruido blanco filtrado en la banda de entrada.

Adicionalmente se alternan los cuatro posibles valores de desfase introducidos por los conmutadores de fase (0°, 90°, 180° y 270°) entre las ramas del polarímetro. De esta forma se obtienen cuatro señales detectadas de forma secuencial que forman parte de una señal sinusoidal v_d que, a su vez, puede ser analizada mediante una transformada de Fourier rápida (FFT son sus siglas en Inglés) para obtener sus componentes principales, es decir el valor DC y el armónico fundamental de la señal. El resto de armónicos resultantes de la FFT se consideran despreciables. Los parámetros de Stokes que definen la polarización de la señal de entrada se pueden obtener a partir del valor de los componentes armónicos principales de la señal detectada tal como se muestra en las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} I_T &= \Re[V_d(DC)] \\ Q &= \Re[V_d(1)]/I_T \\ U &= \Im[V_d(1)]/I_T \\ I &= \sqrt{Q^2 + U^2} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde V_d es la FFT de la señal detectada v_d . En estas expresiones se distingue entre la intensidad total de la señal (I_T) y la intensidad de polarización (I) ya que estos valores solo serán iguales si la señal recibida está 100% polarizada. De hecho el valor de I tal como se define en la ecuación (1) da la medida del grado de polarización de la señal de excitación ya que se han normalizado los valores de Q y U al valor de I_T . De esta forma se obtienen parámetros de Stokes adimensionales en vez de en Voltios. Una vez obtenidos los parámetros de Stokes, se puede calcular alguna figura de mérito que de una idea de la calidad de la medida, como el aislamiento entre los parámetros U y Q que queda definido en la ecuación 2.

$$U/Q|_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(U/Q) \quad (2)$$

A continuación se muestra el resultado de la simulación del modelo de la Fig. 1 utilizando como señal de excitación

una señal 100% polarizada únicamente según el eje-x. Para este caso se tiene por tanto que la componente del campo según el eje y es nula ($E_y = 0$). Entonces, teniendo en cuenta la definición de los parámetros de Stokes en coordenadas cartesianas:

$$\begin{aligned} I &= E_x^2 + E_y^2 \\ Q &= E_x^2 - E_y^2 \\ U &= 2E_x \cdot E_y \end{aligned} \quad (3)$$

Se debe obtener que $I = Q$ y $U = 0$.

La Figura 2 muestra la señal detectada resultante de la simulación del polarímetro en este caso. Los valores de la tensión detectada obtenidos en la simulación se marcan con círculos y se está suponiendo que los conmutadores de fase operan con una frecuencia de 1 Hz, por lo que los desfases entre las ramas se introducen con un periodo de conmutación igual a 1 segundo. El ciclo de conmutación de fase se ha repetido cuatro veces, de modo que se observan los correspondientes 16 valores de tensión detectada.

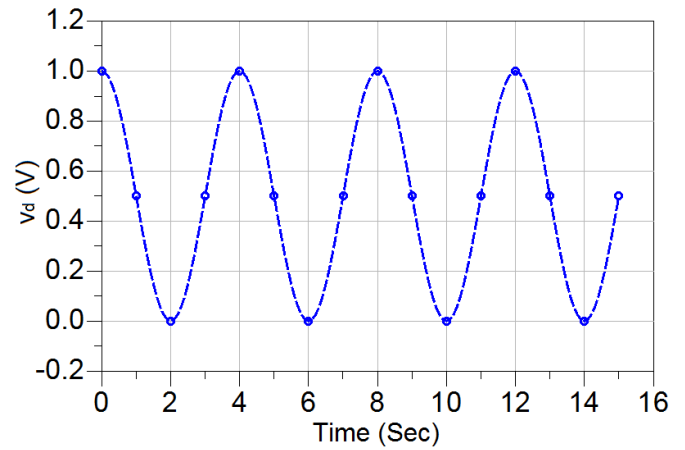


Fig. 2. Señal detectada para el caso de tener como excitación una señal 100% polarizada en la dirección del eje-x.

Si a esta señal se le aplica una FFT y seguidamente se utilizan las ecuaciones (1-2) para calcular los parámetros de Stokes y el aislamiento, se obtienen los resultados de la Tabla 1. La fase de la señal detectada se puede calcular fácilmente y tiene un valor igual a 0 en este caso. Esto es correcto, ya que con este tipo de excitación las señales de ambas ramas del polarímetro deben ser iguales y por tanto tener la misma fase.

Tabla 1. Parámetros de Stokes para una excitación polarizada según el eje-x.

Parámetro de Stokes	Valor
I	1
Q	1
U	$5.55 \cdot 10^{-17}$
U/Q (dB)	-162.6

Este resultado es el ideal para la señal de entrada utilizada, pero resulta bastante obvio que en un caso real no se obtendrán estos resultados debido a los errores sistemáticos del instrumento. En cualquier caso, sigue siendo una buena muestra de que el modelo utilizado representa de forma adecuada el comportamiento del polarímetro.

III. ANÁLISIS DE ERRORES SISTEMÁTICOS

En esta sección se va a analizar el efecto de ciertos errores sistemáticos del instrumento sobre la tensión detectada que proporciona. El análisis realizado se centra en dos tipos de errores sistemáticos como son los desequilibrios de amplitud y fase entre las ramas del polarímetro. Teniendo en cuenta que de forma ideal las dos ramas de amplificación y filtrado del instrumento deberían ser idénticas, se introduce una variación en la amplitud y la fase mediante el parámetro S_{21} de uno de los modelos de amplificador de dicha etapa (Fig. 1). Se debe tener en cuenta que se podría haber utilizado cualquier otro subsistema del receptor para implementar estos errores sistemáticos por lo que, en general, se puede suponer que los errores de amplitud y fase que se analizan aquí se refieren al conjunto del polarímetro al considerarse este un sistema lineal.

Introduciendo una diferencia de ganancia de 3 dB entre los amplificadores de ambas ramas y simulando con una señal de excitación como la de la Sección II, se obtiene una tensión detectada como la de la Figura 3. La diferencia de ganancia está un poco exagerada para que se pueda ver de forma clara el efecto de este tipo de error sistemático, ya que en la práctica no se suelen encontrar errores de amplitud tan grandes.

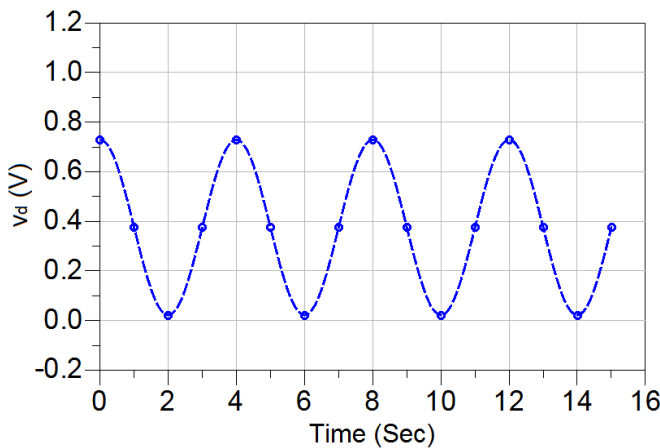


Fig. 3. Señal detectada con una señal de entrada 100% polarizada en la dirección del eje-x y un error de amplitud de 3 dB entre las ramas del polarímetro.

Por un lado se observa que el valor máximo de v_d ha disminuido (0.73 V frente a 1 V) y por otro que aparece un pequeño offset en la señal ya que el valor mínimo deja de ser nulo (0.021 V frente a 0 V). Todo esto redunda en que el porcentaje de polarización medido según esta señal es del 94.31% cuando debería ser del 100%. Por tanto, este error es muy importante ya que puede llevar a pensar que el grado de polarización de la señal recibida es menor del real. Por otro lado, aparece un pequeño error de fase (se pasa de 0° a -0.01°) que se traduce en una reducción del aislamiento hasta un valor igual a -37.5 dB. Este error resulta despreciable frente a los errores de fase sistemáticos como se muestra a continuación.

Simulando con la misma señal de excitación pero introduciendo en este caso una diferencia de fase de 6 grados entre los amplificadores de ambas ramas se obtiene una tensión detectada como la de la Figura 4. Este nivel de error en la fase es habitual en los instrumentos reales, aunque

puede ser introducido también por otros subsistemas como los conmutadores de fase.

En este caso se observa que la amplitud se conserva y que no aparece ningún tipo de offset con lo que el grado de polarización medido sigue siendo del 100% tal y como debe ser. Sin embargo si que se observa que el error de fase se traslada a la señal detectada ya que esta aparece con una fase de 6 grados, en vez de 0, lo que redunda en un valor de aislamiento de -9.78 dB que es claramente un valor inaceptable ya que se espera que un instrumento real tenga del orden de 20 dB de aislamiento [4], lo que supone un error de fase máximo de algo más de medio grado.

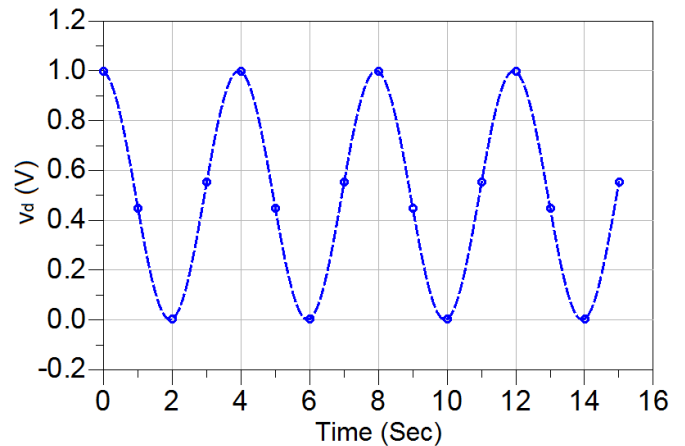


Fig. 4. Señal detectada con una señal de entrada 100% polarizada en la dirección del eje-x y un error de fase de 6 grados entre las ramas del polarímetro.

Finalmente, combinando un error de amplitud de 3 dB y uno de fase de 6 grados se presenta un escenario más próximo a la realidad. La Figura 5 muestra la señal detectada en este último caso en el que se aprecia la combinación de ambos errores.

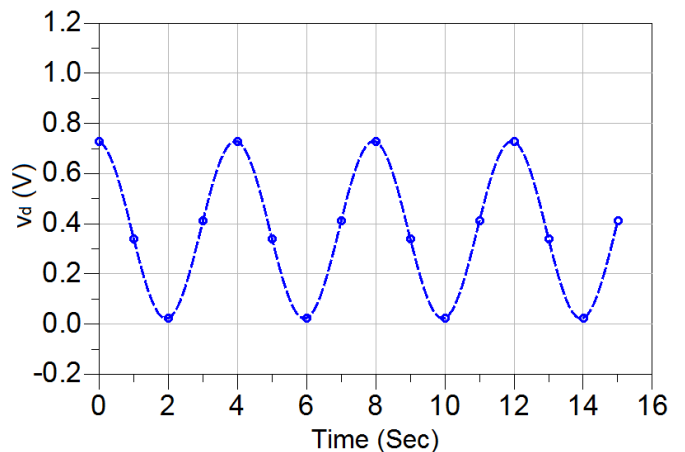


Fig. 5. Señal detectada con una señal de entrada 100% polarizada en la dirección del eje-x, un error de fase de 6 grados y uno de amplitud de 3 dB entre las ramas del polarímetro.

En este caso se observa un porcentaje de polarización del 94.31%, como en el primer caso, y una fase de 5.99 grados junto con valor de aislamiento de -9.79 dB, como en el segundo caso. Este resultado es bastante lógico teniendo en cuenta que, como se ha mostrado anteriormente, los errores de amplitud apenas se reflejan en la fase y viceversa.

IV. EFECTOS SOBRE LA MEDIDA DE LA POLARIZACIÓN

En esta sección se va a analizar cómo afectan los errores de amplitud y fase sobre la medida de la polarización. Para ello se han calculado los parámetros de Stokes correspondientes a cada uno de los casos que se han descrito en la sección anterior.

La Tabla 2 muestra los parámetros de Stokes obtenidos a partir de la señal de la Fig. 3 utilizando las ecuaciones (1- 2). Los valores obtenidos no resultan extraños ($I = Q$ y U es muy pequeño en comparación), salvo por el hecho de que suponen un porcentaje de polarización distinto del 100%. Esto ha de ser tenido en cuenta, de modo que algún tipo de calibración en amplitud ha de ser aplicado para evitar medir un nivel de polarización distinto del real.

Tabla 2. Parámetros de Stokes para una señal de entrada 100% polarizada en la dirección del eje-x y un error de amplitud de 3 dB entre las ramas del polarímetro.

Parámetro de Stokes	Valor
I	0.943
Q	0.943
U	$-1.68 \cdot 10^{-4}$
U/Q (dB)	-37.5

Por otro lado, la Tabla 3 muestra los parámetros de Stokes obtenidos a partir de la señal de la Fig. 4.

Tabla 3. Parámetros de Stokes para una señal de entrada 100% polarizada en la dirección del eje-x y un error de fase de 6 grados entre las ramas del polarímetro.

Parámetro de Stokes	Valor
I	1
Q	0.995
U	0.105
U/Q (dB)	-9.78

Este caso si resulta más problemático debido a que I ya no es exactamente igual a Q y U ya no es tan pequeño, lo que redundaría en un valor de aislamiento que no sería aceptable tal como se ha comentado previamente. Lo que si se tiene es que el porcentaje de polarización es del 100% tal como lo señala el valor de I .

Finalmente la Tabla 4 muestra los parámetros de Stokes obtenidos a partir de la señal de la Fig. 5.

Tabla 4. Parámetros de Stokes para una señal de entrada 100% polarizada en la dirección del eje-x, un error de fase de 6 grados y uno de amplitud de 3 dB entre las ramas del polarímetro.

Parámetro de Stokes	Valor
I	0.943
Q	0.938
U	0.098
U/Q (dB)	-9.79

Este caso es el que se puede presentar de forma más habitual y en el que se combinan los efectos de ambos errores sistemáticos. Efectivamente, aparece un porcentaje de polarización menor del real y un valor de aislamiento no apropiado para una medida precisa de la polarización.

En vista de todo esto, un método de calibración sencillo podría basarse en la implementación de un modelo paramétrico similar al de la Fig. 1 y cuyos parámetros

sirviesen para identificar los posibles errores sistemáticos de amplitud y fase del instrumento. De esta forma, se podrían utilizar señales detectadas medidas en el laboratorio para ajustarlas en simulación, mediante la optimización de los parámetros del modelo. Así se identificarían los errores sistemáticos que determinan las señales detectadas medidas, de modo que a posteriori se pudiesen corregir. Actualmente se está trabajando en dicha metodología de calibración y los resultados se publicarán próximamente.

V. CONCLUSIONES

El presente trabajo está enfocado al análisis de los efectos que tienen los errores sistemáticos sobre la señal detectada de un instrumento diseñado para medir la polarización del CMB en la banda W (90 GHz). Se han tenido en cuenta errores sistemáticos de amplitud y fase en los receptores del polarímetro y se ha visto que errores de amplitud de 3 dB producen errores de aproximadamente el 6% respecto al grado de polarización de la señal recibida mientras que errores de fase de 6 grados dan lugar a valores de aislamiento de menos de 10 dB cuando el valor mínimo aceptable para un instrumento real es del orden de 20 dB. Actualmente se trabaja en un sencillo método de calibración que ayude a identificar el origen de los errores sistemáticos de forma que puedan corregirse.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto AYA2012-39475-C02-01 y del programa CONSOLIDER-INGENIO 2010 referencia CSD2010-00064. Se agradece también al personal del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (DICOM) por los diseños y fabricación de los receptores a 90GHz (AYA2012-39475-C02-02).

REFERENCIAS

- [1] A. A. Penzias and R. W. Wilson, "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s", *Astrophysical Journal*, Vol. 142, pp. 419-421, July, 1965.
- [2] Juan L. Cano et al. "Polarímetro en Banda W para Aplicaciones de Radioastronomía: Diseño y Simulación", contribución presentada al XXX Simp. Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2015, Pamplona, España, 2 – 4 Septiembre, 2015.
- [3] M. López-Caniego et al., "The QUIJOTE CMB Experiment: status and first results with the multi-frequency instrument" Instrumentation and Methods for Astrophysics, Conference Proceedings Rencontres du Vietnam 2013: Cosmology in the Planck Era, 2014, p. 1.
- [4] Enrique Villa et al. "The Thirty Gigahertz Instrument receiver for the QUIJOTE experiment: concept and experimental results. Review of Scientific Instruments. 86 - 2, pp. 24702. 04/02/2015. ISSN 00346748.
- [5] J.A. Rubiño-Martín et al., "The QUIJOTE-CMB experiment: studying the polarisation of the galactic and cosmological microwave emissions", *Proc. SPIE 8444, Ground-based and Airborne Telescopes IV*, 84442Y, September, 2012. doi:10.1117/12.926581.